

# 강구조물의 한계상태 설계법의 기초 개념

## 1. 서언

현재 대표적인 선급에서는 선박 및 해양구조물의 구조설계를 과거의 허용 응력 대신에 한계상태를 기준으로 수행하기 위한 노력을 경주하고 있으며, 이를 위해 한계상태를 기준으로 한 구조설계 Code를 개발중에 있다. 이것은 부분적으로는 국제표준화기구 (International Organization for Standardization)의 권고에 따른 것이다 (ISO 1998). 실제로 토목 구조설계 분야에서는 이미 15여년 전부터 한계상태를 기준으로 구조설계를 수행해 오고 있으나 (AISC 1986, BS 2000), 선박 구조설계 분야에서의 관심과 진행 속도는 상대적으로 더디다는 감이 없지 않다.

본고에서는 선박, 해양구조물 및 토목 구조물을 비롯한 강구조물의 한계상태 설계법에 관한 기초개념을 간략히 소개하고자 한다.

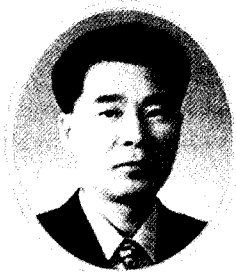
## 2. 한계상태 설계법의 개념

강구조물은 가동중에 다양한 형태의 하중이나 변형의 작용을 받게 되는데, 경우에 따라서는 하중이나 변형의 크기가 아주 크거나 사고적으로 작용하기도 한다. 구조 설계자의 임무는 대상 구조물의 일생동안에 걸쳐 그 같은 하중이나 변형의 작용에 대해 충분히 견디낼 수 있는 구조물을 설계해 내는 일이다.

설계단계에서 구조물은 적절한 크기의 안전여유를 가지게 할 필요가 있다. 이것은 설계 초기에 설정된 구조물의 사용계획을 도중에 변경함으로써 발생할 수 있는 일상적인 가동하중보다 큰 과하중이나 사고하중의 작용을 염두에 두어야 하기 때문이다. 또한, 구조물의 건조과정에 발생할 수 있는 초기결함이나 구조해석 및 강도평가의 불확정성 등을 고려해야 하기 때문이다.

구조물의 설계기준은 보통 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_d \leq R_d \quad (1)$$



백 점 기

- 1957년 1월 7일생
- 1987년 일본 오사카대학 조선공학 박사
- 1989년 부산대학교 조선해양공학과 교수
- 관심분야 : 최종강도 신뢰성, 충돌, 좌초역학
- 연 락 처 : 051-510-2429
- E-mail : jeompaik@hyowon.pusan.ac.kr

여기서,  $S_d = S_k \gamma_f$  = 설계응력,  $R_d = R_k / \gamma_M$  = 설계강도,  $S_k$  = 응력의 특성치,  $R_k$  = 강도의 특성치,  $\gamma_f$  = 응력에 관련된 불확실성을 고려한 응력계수,  $\gamma_M = \gamma_m \gamma_i \gamma_d$  = 강도계수,  $\gamma_m$  = 재료특성치에 관한 불확실성을 고려한 강도 계수,  $\gamma_i$  = 구조파손 모드에 관한 불확실성을 고려한 강도계수,  $\gamma_d$  = 모델링 불확실성을 고려한 강도 계수

식(1)의 설계기준을 만족시키기 위하여 보통 다음의 2가지의 구조설계 기법이 적용되고 있다. 즉,

- 허용응력 설계법 (Allowable stress design method)
- 한계상태 설계법 (Limit state design method)

허용응력 설계법에서는 설계하중의 작용에 의해 발생하는 응력 값을 과거의 경험을 통하여 설정된 특정한 수준의 응력값 (즉, 허용응력값) 보다 크지 않도록 해주는 방법이다. 응력값은 선형 탄성 구조해석을 통하여 얻어지며, 허용 응력값은 통상적인 하중, 강도 및 가동 계획의 변경에 따른 구조파손이 발생하지 않도록 설정된 구조안전 요구사항을 만족하도록 정의된다. 선급협회등에서는 보통 재료의 기계적 특성값 (항복강도, 최종 인장 강도등)을 기준으로 허용응력값을 설정하고 있다.

한편으로 한계상태 설계법에서는 구조물이 설정된 기능을 더 이상 수행하지 못하고 그 기능을 상실하게 되는 상태를 기준으로 설계를 수행하게 된다. 강구조물의 설계시에 한계상태 기준은 일반적으로 적절한 안전여유를 가지고 구조강도가 작용응력보다 작아지지 않도록 설정된다. 토목구조물의 설계분야에서는 한계상태 설계법을 LRFD법 (Load and Resistance Factor Design Method)이라 부르기도 한다.

한계상태 설계법에서 식(1)의  $R_k$ 는 구조물이 한계상태에 도달하기 까지 견디낼 수 있는 하중값이 되며,  $S_k$ 는 허용 응력 설계법에서 처럼 선형탄성 구조해석을 통하여 계산된다. 한계상태 강도값은 설계식이나 비선형 유한요소법 등을 적용하여 계산할 수 있다. 이 때 구조의 기하학적 및 재료적 특성치, 경계조건, 하중조건, 초기결함 등의 영향을 적절히 고려하여 강도를 계

산하는 것이 필요하다. 한계상태 구조해석은 이상화된 구조에 대해 가장 발생하기 쉽고 치명적인 구조파괴를 초래하는 파손모드를 대상으로 수행하게 된다.

과거 10-20년동안에 구조설계법은 과거의 허용응력 설계법에서 한계상태 설계법으로 이행하고 있다. 이것은 후자의 설계법이 전자에 비해 더 많은 잇점이 있다는 것이 확인되고 있기 때문이다.

한계상태 (Limit state)란 특정한 구조부재 또는 구조물 전체가 사전에 설정된 구조물의 기능을 더 이상 수행하지 못하는 상태를 말한다. 국제표준화기구 (ISO 1998)에서는 구조물의 한계상태를 아래의 4가지로 분류하고 있다.

- 운항한계상태 (Serviceability limit state, SLS)
- 최종한계상태 (Ultimate limit state, ULS)
- 피로한계상태 (Fatigue limit state, FLS)
- 사고한계상태 (Accidental limit state, ALS)

운항 한계상태는 다소 덜 치명적인 기능의 저하에 기인된 정상적인 가동의 실패를 가져오는 상태를 말하며, 구조물의 내구성을 감소시키거나 구조적 혹은 비구조적인 요소들의 효율성에 악영향을 미치는 국부적인 손상, 구조적 혹은 비구조적인 요소나 각종 장치의 기능의 효율적인 사용에 악영향을 미치는 큰 변형, 사람에게 불쾌감을 야기하거나 비구조적인 요소나 장치의 기능에 악영향을 미치는 심한 진동이나 소음, 구조물의 미적외관을 해치는 변형이나 처짐 등이 이에 속한다.

최종 한계상태는 구조강성이나 강도의 손실에 의한 구조물의 붕괴를 나타내는 상태로써 국부 또는 구조물 전체의 평형조건의 상실, 소성 항복이나 파단 파괴 등에 의해 구조단면, 부재 혹은 연결부 등이 최대 하중 저항 능력에 도달하거나 판, 보강판 및 지지부재의 좌굴 및 소성붕괴에 의하여 국부 또는 구조물이 전체적으로 불안정해 지는 상태가 이에 속한다.

피로 한계상태는 반복 피로하중의 작용에 의하여 응력 집중이나 균열손상의 누적으로 말미암아 구조 불연속부 등에 피로균열이 발생하는 상태를 말한다.

사고 한계상태는 구조물의 안전성이나 환경에 악영향을 미칠 수 있는 충돌, 좌초, 화재, 폭발 등의 사고로 인하여 과도한 구조손상이 생긴 상태를 말한다.

이들 한계상태를 기준으로 설계를 수행하고자 할 때 식(1)의  $S_d$ 와  $R_d$ 의 값은 각 한계상태의 특성에 따라 다르게 설정되어야 한다는 점을 인식할 필요가 있다.

선박, 교량을 비롯한 강관구조물의 일반적인 한계상태 설계법은 구조설계 지침서나 여러 교과서 등에서 자세하게 소개되고 있다 (AISC 1986, BS 2000). 특히 강관구조물의 최종 한계상태법에 대한 자세한 내용은 Dowling 등 (1992), Paik & Thayamballi (2002)에 소개되고 있다.

### 3. 결 언

끝으로 이 지면을 빌려 한국 조선산업에 관한 필자의 소감을 피력해 보고자 한다. 1999년 이후 현재 한국의 조선산업은 일본을 제치고 세계 제1위의 위치를 굳건히 지켜오고 있다. 한국이 세계 조선산업의 리더로서 얼마동안 활동할 수 있을 것인가? 우리의 희망으로서 최소한 약 50년간은 세계 제 1위의 자리에 있을 수 있다면 좋겠다. 과연 이 같은 '희망'은 실현 불가능한 것인가?

필자는 개인적으로 다른 학문보다 조선공학을 전문 분야로 선택한 것에 대해 항상 자부심을 느끼고 있다. 각 나라는 국제무역이라는 과정을 거치지 않고는 생존하기 어렵다. 즉, 다양한 중요 자원 (에너지원, 식량 등)은 지역적으로 편재되어 있으며, 인간생활에 필요한 다양한 생필품도 한 나라에서 전부 생산할 수 없기 때문에 각국간에 상호 교환이나 무역이 필요하게 되는 것이다. 그런데, 우리가 살고 있는 지구상에서 바다가 차지하는 표면적은 전체 지구표면적의 약 73%에 이르고 있다. 따라서, 바다를 사이에 둔 국가간의 에너지원이나 상품의 수송을 위해서는 선박이라는 운송수단이 필수적이다. 이것은 21세기와 같은 기술수준이 비약적으로 발전하리라 예상되는 시기에도 동일할 것이다. 이를테면 경제성 등을 감안할 때 석유나 액화천연가스를

항공기로 운송한다는 것은 21세기에 생각하기 어렵다. 한편으로 이미 FPSO 선 (Floating, Production, Storage and Offloading), 초대형 초고속 컨테이너선이나 LNG 운반선 등을 비롯한 첨단 고부가 가치선박의 건조수요가 크게 증가하고 있으며, 보다 고도의 선박설계 기술이 필요하게 될 것이다. 그리고, 21세기에는 인간의 수명연장과 함께 노령화 사회로 이행되고 있으며, 그 결과 소위 실버산업의 활성화가 예상된다. 이와 함께 첨단 호화 크루저나 호화 요트의 건조 수요가 증가하게 될 것이다. 선박건조와 공급이 안정적으로 이루어지지 않는다면 세계 질서는 무너질 위험도 있을 것이다. 이처럼 조선산업에 종사하는 사람들은 세계평화를 위해서도 상당한 기여를 하고 있는 셈이다.

위에서 제기한 질문으로 되돌아가서 문제는 어느 정도 실속과 내실이 있는 세계 제1위의 자리를 유지 발전시켜 나가느냐가 중요한 관건이 되리라 사료된다. 본고에서 소개한 한계 상태 설계기법을 비롯하여 선박 및 해양구조물에 대한 핵심 설계기술의 연구 개발을 이제는 한국의 조선소, 학계, 연구소가 세계를 리드하면서 주도적으로 수행할 때가 되었다고 강조하고 싶다.

### 참고문헌

- AISC, Manual of Steel Construction, Load & Resistance Factor Design, American Institute of Steel Construction, 1986.
- BS, Steel, Concrete and Composite Bridges, BS 5400, British Standard Institute, 2000.
- Dowling, P.J., Harding, J.E. and Bjorhovde, R., An International Guide for Constructional Steel Design, Elsevier Applied Science, London & New York, 1992.
- ISO, General Principles on Reliability for Structures, ISO 2394, International Organization for Standardization, 1998.
- Paik, J.K. and Thayamballi, A.K., Ultimate Limit State Design of Steel Plated Structures, John Wiley & Sons, London, 2002.